烟蚜茧蜂随寄主有翅桃蚜迁飞而被携带扩散的模拟实验

郭　近[1], 冯明光[2], 陈学新[1,*]
(1. 浙江大学农业与生物技术学院昆虫科学研究所, 作物病虫分子生物学农业部重点开放实验室, 杭州 310029;
2. 浙江大学生命科学学院微生物研究所, 杭州 310058)

摘要: 蚜虫寄生蜂的广泛分布可能与有翅蚜的迁飞有关。为了证明这一假说, 本研究利用微小昆虫飞行磨系统, 分数十批(≤16 头/批)对被烟蚜茧蜂 *Aphidius gifuensis* Ashmead 单头寄生后的有翅桃蚜 *Myzus persicae* (Sulzer)进行模拟飞行并系统观察了飞行后有翅桃蚜的单头定殖情况。对实验观察数据按飞行时间和飞行距离进行归类, 采用单因素方差分析方法分析飞行时间和飞行距离对有翅桃蚜定殖后的存活和生殖力、烟蚜茧蜂发育等变量的影响; 采用多项式回归分析对所有变量和归类的数据进行统计和分析。结果表明: 成功飞行并定殖的有翅桃蚜有 378 头, 其中 239 头有翅桃蚜定殖后形成僵蚜。形成僵蚜的有翅桃蚜在飞行实验时平均飞行时间和飞行距离分别为 2.63 h 和 2.16 km, 定殖后平均存活了 6.11 d, 定殖第 6 天和第 14 天平均产若蚜累计数量分别为 8.5 头和 162 头。形成僵蚜和未形成僵蚜的有翅蚜的模拟飞行数据和定殖观察数据无显著差异。形成僵蚜的 239 头有翅桃蚜中, 最终成功育出烟蚜茧蜂 205 头, 僵蚜出蜂率为 85.8%。雌雄性比为 1∶5.2。结论认为, 专性寄生蚜虫的烟蚜茧蜂可以利用有翅蚜的迁飞而被携带扩散传播, 有翅蚜迁飞在蚜虫寄生蜂扩散中具有重要作用。

关键词: 蚜虫; 桃蚜; 烟蚜茧蜂; 寄生蜂; 迁飞扩散; 模拟飞行
中图分类号: Q968　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 0454-6296(2010)02-0175-08

Experimental simulation of transmission of an obligate aphid parasitoid *Aphidius gifuensis* Ashmead (Hymenoptera: Braconidae) with flight dispersal of alates of *Myzus persicae* (Sulzer) (Homoptera: Aphididae)

GUO Jin[1], FENG Ming-Guang[2], CHEN Xue-Xin[1,*] (1. Ministry of Agriculture Key Laboratory of Molecular Biology of Crop Pathogens and Insects, Institute of Insect Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; 2. Institute of Microbiology, College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The wide dispersal of aphid parasitoids is most likely related to the flight of parasitized alates. This hypothesis was examined *via* simulated flight and post-flight colonization of green peach aphid, *Myzus persicae* (Sulzer) alates parasitized individually by a common obligate aphid parasitoid, *Aphidius gifuensis* Ashmead. Data grouped by flight time (h) and flight distance (km) were analyzed using one-way ANOVA procedure, and for all the variables, a stepwise procedure of polynomial regression analysis was used. The results showed that a total number of 378 alates flew successfully in different batches, and among them, 239 alates were mummified finally. Mummified alates flew for an average time and distance of 2.63 h and 2.16 km, respectively, survived for an average time of 6.11 d, and laid 8.5 nymphs and 162 nymphs per alate during a 6-day and 14-day post-flight period, respectively. The non-mummified alates did not differ significantly in these statistics from the mummified alates. Associated parasitoids successfully developed in the mummified alates, and eventually a total of 205 mummified alates emerged as adult wasps (85.8%) with a sex ratio of 1∶5.2. We so conclude that host dispersal flight is utilized by aphid parasitoids for their own dispersal. The results highlight the significant role of aphid dispersal flight in disseminating parasitoids.

Key words: Aphid; *Myzus persicae*; *Aphidius gifuensis*; parasitoid; flight dispersal; simulated flight

---

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(30625006); 科技部"973"计划项目(2006CB102005); 教育部"创新团队发展计划"项目(IRT0355)
作者简介: 郭近, 女, 1982 年生, 硕士研究生, 研究方向为农业昆虫与害虫防治, E-mail: guojiner@163.com
* 通讯作者 Corresponding author, Tel.: 0571-86971219; E-mail: xxchen@zju.edu.cn
收稿日期 Received: 2009-08-21; 接受日期 Accepted: 2010-01-23

蚜虫是一类植食性昆虫，在世界范围内广泛分布，许多蚜虫种类是农业上的重要害虫(Dixon，1998)。目前，世界上记载的蚜虫初寄生蜂有400多种，最主要的蚜虫初寄生蜂是茧蜂科(Braconidae)的蚜茧蜂亚科(Aphidiinae)，此外，还包括蚜小蜂科(Aphelinidae)的一些种类(Mackauer and Stary，1967；Stary，1988)。寄生蜂产卵于蚜虫体内，孵化出的幼虫在蚜虫体内取食，因此，蚜虫寄生蜂是控制蚜虫种群的重要天敌(DeBach，1964；Stary，1988)。目前关于蚜虫及其寄生蜂互作关系的研究很多(Havill and Foottit，2007)，然而，这些关于蚜虫和寄生蜂相互关系的报道(Hufbauer，2001；Schellhorn *et al*.，2002；Snyder and Ives，2003)都没有涉及寄主有翅蚜迁飞对寄生蜂分布、二者协同进化及其相互关系可能产生影响方面的研究。

Baer 等(2004)以菜蚜茧蜂 *Diaeretiella rapae* 及其两种寄主蚜虫甘蓝蚜 *Brevioryne brassicae* (Linnaeus)和麦双尾蚜 *Diuraphis noxia* (Mordvilko)作为研究系统，证明菜蚜茧蜂并未表现出与寄主相关的分化。为了明确来自两种不同寄主的菜蚜茧蜂是否已经在遗传上分化形成不同的“寄主宗”，他们以线粒体 DNA(mitochondrial NDA，mtDNA)序列多样性为基础，构建了菜蚜茧蜂单倍型遗传网络(haplotype network)，应用单链构象多态性(single-strand conformation polymorphism，SSCP)分析方法检查了 mtDNA 的 2 041 个碱基对并识别出了 42 个不同的 SSCP 遗传单倍型的核苷序列，发现不论来自原始地区(欧洲、地中海、中东、亚洲)还是来自引进地区(北美西部)的菜蚜茧蜂，其 mtDNA 遗传单倍型与寄主蚜虫种类间没有相关性；菜蚜茧蜂的原始型遗传单倍型具有广泛的地理分布，不论菜蚜茧蜂寄生于甘蓝蚜还是麦双尾蚜均能检测到其原始型的遗传单倍型，这表明菜蚜茧蜂寄生两种寄主的时间要远远早于菜蚜茧蜂的 mtDNA 分化时间。同样，Baker 等(2003)的研究发现北美地区(菜蚜茧蜂的引进区域)菜蚜茧蜂的遗传多样性要低于欧洲和亚洲地区(菜蚜茧蜂的原始区域)。可见，持续进行的基因漂流阻碍了新“寄主宗”的形成。那么，是什么原因造成基因漂流持续发生而没有间断呢？这些报道中并未阐明产生这种现象的原因。我们推测，一种可能性是寄生蜂种类可能随寄主蚜虫的扩散而传播。

然而，尽管专主寄生蚜虫的寄生蜂，如蚜茧蜂与其寄主蚜虫的关系非常紧密，但到目前为止还没有关于寄生蜂利用寄主蚜虫的飞行而扩散的研究报道。冯明光等研究了有翅蚜的扩散能力及其在传播蚜虫病原真菌中的作用，他们采用黄布加植物的诱集方法，2001－2007 年间在杭州和云南两地分别诱集到空中迁飞的有翅蚜虫 3 183 头和 3 553 头，在将诱集到的有翅蚜进行单头定殖饲养观察时惊奇地发现，分别有 106 头(占总诱集数量的4.4%)和 99 头(占2.8%)有翅蚜饲养后形成僵蚜，并最终羽化出寄生蜂，经鉴定这些寄生蜂的种类为烟蚜茧蜂 *Aphidius gifuensis* Ashmead、菜蚜茧蜂、麦蚜茧蜂 *Ephedrus plagiator* (Nees)和苹果绵蚜小蜂 *Aphelinus mali* (Haldeman)，由此在国内外首次提出寄生蜂可随有翅蚜迁飞而被携带传播扩散的假说(Feng *et al*.，2007；Huang *et al*.，2008)。

烟蚜茧蜂分布广泛，可寄生许多种类的蚜虫，如：大豆蚜 *Aphis glycines* Matsumura、棉蚜 *Aphis gossypii* Glover、萝卜蚜 *Lipaphis erysimi* (Kaltenbach)、麦长管蚜 *Sitobion miscanti* (Takahashi)和桃蚜 *Myzus persicae* (Sulzer)等。本研究以桃蚜和烟蚜茧蜂作为研究系统，利用微小昆虫飞行磨系统，通过对被烟蚜茧蜂寄生的有翅桃蚜进行模拟飞行实验，测定被烟蚜茧蜂寄生后有翅桃蚜的迁飞能力、定殖能力、孤雌生殖力以及寄生蜂的羽化情况，所获数据经统计与模型模拟分析，将为寄生蜂随有翅桃蚜迁飞而被携带扩散传播的假说提供有力的生物学证据。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

实验均在温度 20～23℃，光照 14L:10D，相对湿度50%～60%的养虫室和智能人工气候室内进行。所需桃蚜饲养在置于养虫笼内的盆栽甘蓝 *Brassica oleracea* cv. Jingfeng 1 上以保持实验种群。烟蚜茧蜂的种群采用单头寄生 2～3 龄桃蚜若虫的方法获得，寄生后的若蚜仍在甘蓝上饲养，每日观察被烟蚜茧蜂寄生的若蚜的发育情况，待形成僵蚜后，将僵蚜用毛笔轻挑入小透明盒中等待羽化，羽化的烟蚜茧蜂喂以 20% 蜂蜜水。进行飞行实验前，选择羽化 2～5 日龄的烟蚜茧蜂，单头寄生健壮的有翅桃蚜成蚜(≤1 日龄)，寄生成功后将有翅桃蚜放在叶子圆片(刘树生，1987)上饲养 12 h 左右，以保证烟蚜茧蜂的卵已在有翅桃蚜体内孵化。

1.2　被烟蚜茧蜂寄生的有翅桃蚜的模拟飞行

中国农业科学院植物保护研究所研制的微小昆虫飞行磨系统（程登发等，1997）是研究被烟蚜茧蜂寄生的有翅桃蚜的模拟飞行实验的关键设备。飞行磨装置和模拟飞行的方法已经在许多报道中进行过详述（Feng *et al*.，2004；Chen and Feng，2005，2006）。每只飞行磨由 U 型金属支架、磁铁、轴针（昆虫标本针）、悬臂、遮光片和光电探头等部分组成。U 型金属支架上下各有一磁铁，在磁场的作用下，轴针直立且接触 U 型金属支架下表面，轴针中下端部位固定一黑色遮光片（Chen and Feng，2004）。由于模拟飞行系统只有 16 只飞行磨，每批次最多只能飞行 16 头有翅桃蚜，因此，被寄生有翅桃蚜的模拟飞行实验分数 10 批次进行。模拟飞行时，以少许水性阿拉伯胶作为粘附剂，将有翅桃蚜的下腹部粘附在飞行磨悬臂的末端，轻轻吹气，使有翅桃蚜进入圆周运动状态，模拟飞行时间为 1 ~5 h。随着有翅蚜持续翅振，圆周运动继续下去，轴针每旋转 1 次，也带动遮光片旋转 1 次，并使光电感应器发生 1 次反应。通过光电感应器与计算机的连接导线，每 1 次圆周运动的光电信号就会输入计算机并记录下来，根据悬臂长度计算圆周运动的距离。据此，每头有翅蚜模拟飞行一定时间后，其飞行距离及速率便可从计算机库中读出。

1.3　被烟蚜茧蜂寄生的有翅桃蚜的飞行后定殖

飞行结束后，用蘸有蒸馏水的毛笔逐头点滴溶化有翅桃蚜腹部与悬臂固定处的阿拉伯胶，轻轻将有翅桃蚜挑下，置于甘蓝苗上进行单头饲养，对模拟飞行后未受明显损伤（受损伤的有翅桃蚜去除）的有翅桃蚜进行 14 d 的定殖观察。定殖观察用的甘蓝苗种植在大棚内。进行定殖观察实验时，将生长至 10 cm 左右高的甘蓝苗移栽入高 4.5 cm、直径 3.3 cm 的小杯内（小杯底部开孔），确保其正常生长后，冲洗净甘蓝苗，再将栽有甘蓝苗的小杯放入 430 mL 的一次性塑料杯中，杯壁扎若干小孔以利空气流通。塑料杯用刺有微孔的保鲜膜封口，以防止有翅蚜逃逸。连续观察 14 d，观察被烟蚜茧蜂寄生的有翅桃蚜定殖后繁殖后代蚜群和形成僵蚜的情况；对于羽化的寄生蜂，用 20% 蜂蜜水饲养，观察持续至寄生蜂死亡。

在定殖期间，逐日定时检查每头有翅桃蚜的状态（存活、死亡或形成僵蚜）、产若蚜数、后代若蚜的存活数、僵蚜内的寄生蜂羽化（数量、性别）、成蜂死亡时间等情况。

1.4　数据统计分析

根据以上实验观察结果，对有翅桃蚜的模拟飞行结果进行如下统计。按照定殖的被烟蚜茧蜂寄生的有翅桃蚜最终是否形成僵蚜，将观察数据分为两类。对于最终形成和未形成僵蚜的有翅桃蚜分别按照飞行时间 1 h，3 h 和 5 h 3 个组别和飞行范围不超过 1 km，1 ~3 km，3 ~5 km 和 5 km 以上 4 个组别进行统计。采用单因素方差分析方法（唐启义和冯明光，2002）统计和分析飞行时间和飞行距离对有翅桃蚜定殖后的存活和生殖力、烟蚜茧蜂发育等变量的影响。采用多项式回归分析方法（唐启义和冯明光，2002）对所有变量和归类的数据进行统计和分析，比较变量间的显著性差异，并解释被寄生的有翅桃蚜的飞行能力和飞行后定殖能力之间的关系。

2　结果与分析

2.1　被烟蚜茧蜂寄生的有翅桃蚜飞行后存活和定殖

共有 378 头被烟蚜茧蜂寄生的有翅桃蚜成功进行 1 ~5 h 的模拟飞行并定殖，所获数据按照模拟飞行的飞行时间和飞行距离分组（表 1，2）。其中，共有 239 头被烟蚜茧蜂寄生的有翅桃蚜定殖 6.11 d（平均存活时间）后最终形成僵蚜，这些被寄生的有翅桃蚜在模拟飞行时平均飞行了 2.16（0.01 ~10.7）km。另外 139 头（占 36.8%）有翅桃蚜定殖后最终未形成僵蚜，它们在模拟飞行时平均飞行了 2.60（0.01 ~9.7）km。最终形成僵蚜的 239 头有翅桃蚜在定殖的第 6 天，每头定殖有翅桃蚜累计产若蚜 8.5 头，第 14 天每头累计产若蚜 162 头。139 头最终未形成僵蚜的有翅蚜，在定殖的第 6 天每头定殖有翅桃蚜累计产若蚜 8.5 头，定殖第 14 天累计产若蚜 156.3 头。从预期来看，后代成蚜最大繁殖力应为 8.5 * 8.5 头，即 72.25 头，第 14 天累计每头累计产若蚜为 80.75（8.5 +72.25）头，而实际观察定殖分别是为 162 和 156.3 头，可见，定殖后代成蚜的繁殖能力要强于模拟飞行后定殖的当代有翅桃蚜。本实验中有翅蚜定殖后“存活时间”特指有翅蚜定殖后到形成僵蚜的时间，此时烟蚜茧蜂幼虫发育到 4 龄幼虫初期，蚜虫腹背中部呈白色，头胸部亦为白色（毕章宝和季正端，1993）。

表 1 按模拟飞行时间分类被烟蚜茧蜂寄生的有翅桃蚜定殖后的存活和生殖力比较

Table 1 Survival time and fecundity during post-flight colonization of *Myzus persicae* alates attacked pre-flight by *Aphidius gifuensis* based on the time length of simulation flight

飞行时间(h) Flight time	飞行蚜虫数量(头) Number of alates flown	飞行距离(km) Flight distance	存活时间(d) Survival time	定殖的每头有翅蚜繁殖后代数量(头) Number of progeny individuals per alate or colony	
				第 6 天 Day 6	第 14 天 Day 14
形成僵蚜的有翅蚜 Mummified alates					
1	113	0.74 ±0.96 c	6.17 ±0.64 a	9.2 ±4.8 a	180.5 ±80.3 a
3	57	2.33 ±1.68 b	6.07 ±0.75 a	7.4 ±4.0 b	129.6 ±67.0 b
5	69	4.35 ±2.80 a	6.04 ±0.88 a	8.4 ±5.5 ab	158.5 ±99.6 ab
未形成僵蚜的有翅蚜 Unmummified alates					
1	43	1.01 ±1.42 c	8.6 ±4.6 a	170.0 ±86.0 a	
3	39	2.38 ±1.65 b	7.5 ±4.0 a	144.9 ±74.3 a	
5	57	3.96 ±2.99 a	9.1 ±6.2 a	154.1 ±80.1 a	

注 Notes：表中同列数据(平均值 ± 标准差)后不同字母代表显著性差异 (Tukey's HSDs, $P<0.05$；形成僵蚜有翅蚜在方差分析中的自由度 df_1 和 df_2 分别为2, 236, 未形成僵蚜有翅蚜在方差分析中的自由度 df_1 和 df_2 分别为2, 136)。Means (± *SD*) with different letters in the same column differed significantly (Tukey's HSDs, $P<0.05$; df_1 and df_2 in ANOVA were 2 and 236 for mummified alates, and 2 and 136 for unmummified alates).

表 2 按模拟飞行距离分类被烟蚜茧蜂寄生的有翅桃蚜定殖后的存活、生殖力比较

Table 2 Survival time and fecundity during post-flight colonization of *Myzus persicae* alates attacked pre-flight by *Aphidius gifuensis* based on their flight range

飞行距离(h) Flight range	飞行蚜虫数量(头) Number of alates flown	飞行时间(h) Flight time	飞行距离(km) Flight distance	存活时间(d) Survival time	定殖的每头有翅蚜繁殖后代数量(头) Number of progeny individuals per alate or colony	
					第 6 天 Day 6	第 14 天 Day 14
形成僵蚜的有翅蚜 Mummified alates						
<1.0	114	1.63 ±0.28 d	0.38 ±0.28 d	6.18 ±0.70 a	8.8 ±4.2 a	175.1 ±92.1 a
1.0 –3.0	46	2.43 ±1.38 c	1.64 ±0.55 c	6.04 ±0.67 a	8.4 ±5.7 a	151.8 ±66.4 ab
3.0 –5.0	45	3.84 ±1.31 b	3.68 ±0.58 b	6.00 ±0.83 a	8.3 ±6.1 a	131.8 ±75.7 b
>5.0	34	4.65 ±0.92 a	6.82 ±1.75 a	6.09 ±0.87 a	8.2 ±4.4 a	171.3 ±95.4 a
未形成僵蚜的有翅蚜 Unmummified alates						
<1.0	50	2.40 ±1.77 c	0.32 ±0.27 d		8.8 ±5.2 a	175.6 ±78.7 a
1.0 –3.0	42	3.05 ±1.50 bc	1.90 ±0.60 c		7.8 ±4.2 a	156.7 ±75.1 a
3.0 –5.0	17	3.71 ±1.21 ab	3.72 ±0.45 b		8.2 ±4.4 a	124.5 ±66.1 a
>5.0	30	4.47 ±1.17 a	6.77 ±1.42 a		9.2 ±6.8 a	142.3 ±88.8 a

注 Notes：表中同列数据(平均值 ± 标准差)后不同字母代表显著性差异 (Tukey's HSDs, $P<0.05$；形成僵蚜有翅蚜在方差分析中的自由度 df_1 和 df_2 分别为4, 473, 形成僵蚜有翅蚜在方差分析中的自由度 df_1 和 df_2 分别为4, 273)。Means (± *SD*) with different letters in a column differed significantly (Tukey's HSDs, $P<0.05$; df_1 and df_2 in ANOVA were 4 and 473 for mummified alates, and 4 and 273 for unmummified alates).

统计分析表明，最终未形成僵蚜与形成僵蚜的被寄生有翅桃蚜在飞行距离及繁殖力上没有表现出明显差异。当烟蚜茧蜂卵在桃蚜体内处于初始发育阶段时，有翅桃蚜的飞行能力并未受到显著影响。被烟蚜茧蜂寄生的有翅蚜飞行后定殖时，后代蚜虫数量随定殖天数的变化趋势如图 1 所示。通过逐日逐头观察并记录被烟蚜茧蜂寄生有翅桃蚜在 14 d 定殖观察期内繁殖后代情况得出图 1。按照有翅桃蚜是否形成僵蚜、飞行时间和飞行距离 3 个指标分为 4 组，分别为按飞行时间分为 A、B 两组：组 A ($n=239$；形成僵蚜)，组 B ($n=139$；未形成僵蚜)；按飞行距离分为 C、D 两组：组 C ($n=239$；形成僵蚜)，组 D ($n=139$；未形成僵蚜)。对 4 组数据进行比较发现，在 1 ~6 d 的定殖观察中，不同分

组的单头定殖有翅桃蚜的后代蚜虫数量均表现出相似的变化趋势。

2.2　定殖后烟蚜茧蜂的发育

由表3可见，形成僵蚜的239头有翅桃蚜中，最终有205头羽化出蜂，羽化率为85.8%，其中雌蜂33头、雄蜂172头，分别占总羽化总寄生蜂头数的16.1%和83.9%，雌雄性比为1∶5.2。然而，当按飞行时间1，3和5 h将羽化的寄生蜂分为3组后，各组的雌雄性比分别为1∶4.5，1∶4和1∶9。其中，飞行5 h的有翅桃蚜所羽化的烟蚜茧蜂的雌雄性比最低，即羽化10头烟蚜茧蜂中仅有1头是雌蜂。

表3　有翅桃蚜迁飞对烟蚜茧蜂发育的影响

Table 3　Effect of *Myzus persicae* flight on developmental duration of *Aphidius gifuensis*

被寄生有翅蚜飞行时间 Pre-colonization flight of alates		羽化烟蚜茧蜂的数量和性别 Number and sex of wasps from alate mummies	发育时间(d) Developmental duration	
时间(h) Time	距离(km) Distance		卵和幼虫 Egg and larva	预蛹和蛹 Prepupa and pupa
1	0.59±0.43 d	17(♀)	6.06±0.66 a	3.88±1.05 a
	0.77±1.05 cd	77(♂)	6.21±0.68 a	4.07±0.84 a
3	1.74±2.05 c	10(♀)	6.20±0.63 a	3.90±0.74 a
	2.51±1.59 bc	40(♂)	5.93±1.04 a	3.98±0.85 a
5	6.05±3.19 a	6(♀)	6.17±0.75 a	3.67±0.82 a
	4.09±2.69 b	55(♂)	6.02±1.04 a	4.16±0.66 a
合计 Pooled	2.20±2.38	205(♀+♂)	6.08±0.73	4.04±0.81

注 Notes：表中同列数据(平均值±标准差)后不同字母代表显著性差异(Tukey's HSDs，$P<0.05$)。Means (±*SD*) with different letters in a column differed significantly (Tukey's HSDs, $P<0.05$).

烟蚜茧蜂在寄主有翅蚜体内从卵到4龄幼虫初期和从4龄幼虫到蛹期的发育时间分别为6.08 d和4.04 d(表3)。按有翅桃蚜飞行时间或飞行距离分组，寄生蜂的发育时间或者雌雄性比，均未表现出显著差异。

2.3　有翅蚜后代蚜群数量随定殖天数的变化趋势

被烟蚜茧蜂寄生的有翅桃蚜在模拟飞行后，飞行时间和飞行距离对有翅桃蚜定殖时繁殖能力的影响如图1所示。无论定殖过程中被寄生的有翅桃蚜是否形成僵蚜，A，B，C，D 4组随定殖天数延长有翅桃蚜后代蚜虫数量均表现出相似的变化趋势。从第7天起，有翅桃蚜定殖最初产出的一批若蚜在饲养条件下已发育为成蚜并开始新一代繁殖，各组别的蚜群数量快速上升。从第7天起，不论是否形成僵蚜，飞行1 h的有翅桃蚜的生殖力均强于飞行3 h和5 h的有翅桃蚜。同样，从第7天起，按飞行距离分组，飞行不超过1 km的有翅桃蚜的生殖力均强于其他飞行距离的被寄生有翅桃蚜。这些数据表明，被烟蚜茧蜂寄生的有翅桃蚜飞行后完全有能力繁殖后代，并且能够建立新的种群。

3　讨论

尽管寄生蜂，如蚜茧蜂与寄主蚜虫之间关系密切，但目前几乎没有关于寄主蚜虫飞行携同寄生蜂扩散的研究报道(Feng *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2008)。因而，寄主蚜虫迁飞扩散对其寄生蜂扩散的潜在作用目前还知之甚少。

通过对被烟蚜茧蜂寄生后的有翅桃蚜进行模拟飞行数据以及模拟飞行后的定殖观察数据进行分析，为寄主蚜虫迁飞携带其专性寄生蜂，如烟蚜茧蜂迁飞扩散提供了依据。通过对有翅桃蚜模拟飞行距离分析表明，有翅蚜被寄生蜂寄生后完全能够自主飞行并携带其体内的寄生蜂迁飞、扩散，且迁飞后能够成功定殖，携同寄主有翅蚜迁飞的烟蚜茧蜂也能够成功羽化。该实验结果肯定了蚜虫寄生蜂可以利用寄主蚜虫迁飞而扩散，也证实了寄生蜂随寄主有翅蚜迁飞而扩散的假说(Feng *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2008)。

模拟飞行实验表明，被寄生的有翅蚜完全有能力通过自主振翅而自动飞行，在1~5 h的模拟飞行过程中，飞行距离为0.01~10.7 km，在定殖观察

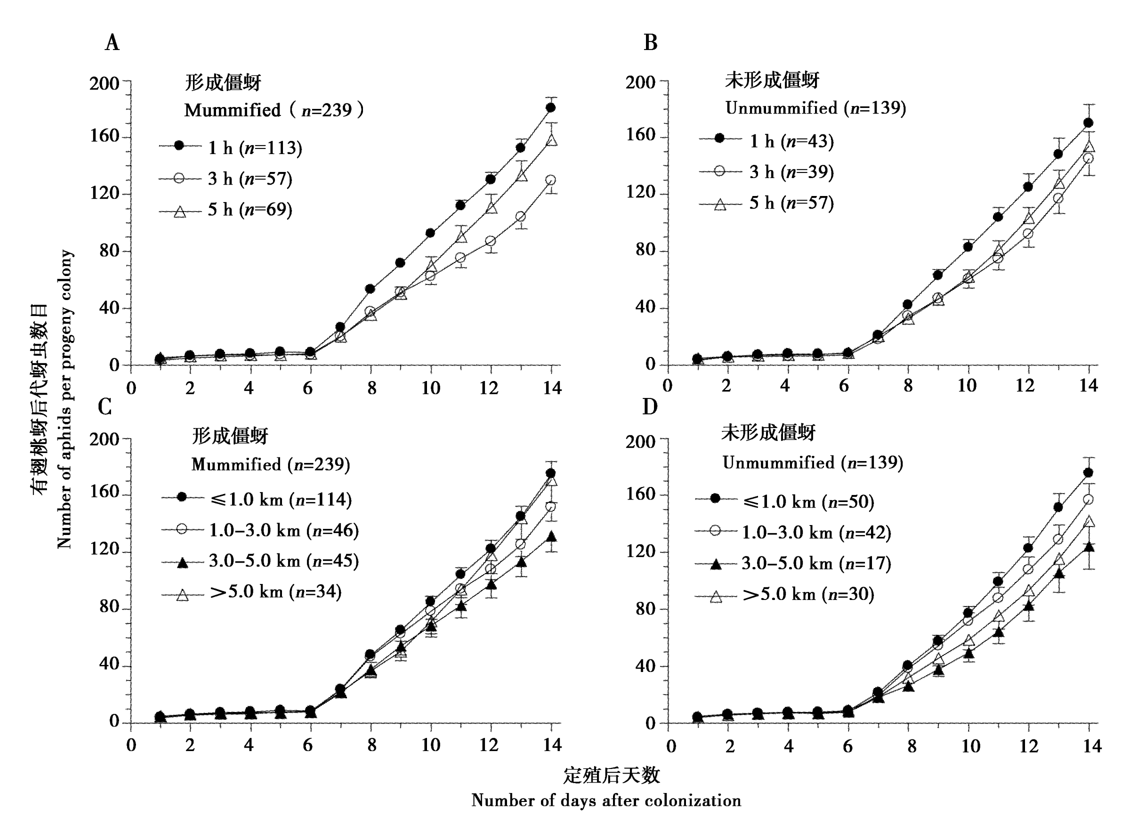


图 1　被烟蚜茧蜂寄生的有翅桃蚜后代蚜虫数量随定殖天数的变化趋势

Fig. 1　Developing trends of progeny colonies of *Myzus persicae* alates parasitized preflight by *Aphidius gifuensis* during their post-flight colonization

按最终是否形成僵蚜划分成两类，形成僵蚜的有翅桃蚜按飞行时间(A)和飞行距离(C)分组，未形成僵蚜的有翅桃蚜按飞行时间(B)和飞行距离(D)分组 All parasitized alates were divided into "mummified" and "unmummified" ones. Mummified alates were grouped by dispersal flight of different time (A) and different distance (C). Unmummified alates were grouped by dispersal flight of different time (B) and different distance (D). 误差棒 Error bars: *SE*.

的第 14 天，有翅蚜平均繁殖后代累计超过 150 头；239 头形成僵蚜的有翅蚜，最终成功育出 205 头寄生蜂，僵蚜出蜂率为 85.8%。结果表明蚜虫寄生蜂在飞行后的寄主有翅桃蚜体内可正常发育，并且所羽化的寄生蜂数量足以建立新的寄生蜂种群。羽化出的寄生蜂的雌雄比为 1∶5.2，雌峰比例相对较少。这可能是由于有翅蚜不是寄生蜂发育的最适宜寄主发育期(适宜寄主发育期是若蚜)，当寄主不适宜或寄主的发育阶段不是寄生蜂的最佳产卵阶段或寄主个体偏小时，膜翅目寄生蜂偏好在不适宜寄主上产雄性寄生蜂卵(King, 1987)。尽管如此，本实验中所羽化的寄生蜂数量完全能够保证烟蚜茧蜂建立新的种群。

自然条件下，有翅蚜可通过主动振翅飞行相当长的距离(Robert, 1987)，有翅蚜在飞行中由于要面对各种自然因素(如风、雨等)的干扰必将耗费更多的能量(Dixon, 1987)。桃蚜羽化后 2－3 d 接受寄生蜂产卵时平均产若蚜数是未被寄生桃蚜的 50%左右(刘树生, 1990)，烟蚜茧蜂寄生对烟蚜的产仔量及寿命影响较大，成蚜被寄生后产仔量为 7.9头，与对照相比下降 89.5%(吴兴富等, 2003)。因此，不难解释为何定殖第 14 天每头有翅桃蚜的产若蚜数 162 头，远远大于预计值(80.75)的原因。本次实验通过观察烟蚜茧蜂是否对有翅桃蚜发生寄生产卵的动作，来判定寄生是否成功，一些烟蚜茧蜂虽然对桃蚜发生了寄生(产卵)的动作，但不一定成功产卵，因为烟蚜茧蜂对烟蚜的成功寄生很大程度上取决于烟蚜茧蜂对不同龄期烟蚜寄生的选择性(或嗜好性)，雌蜂产卵时对 III 龄若蚜有明显的选择性(毕章宝和季正端, 1994)；当烟蚜受到烟蚜茧蜂攻击时，成蚜扭动身躯增加烟蚜茧蜂产卵器穿刺难度的能力较其他龄期烟蚜强，这就延长了烟蚜茧蜂对无翅成蚜的处理时间，从而降低了成功产卵(寄生)的概率(吴兴富等, 2003)。有翅蚜在飞行

过程中耗费更多的能量也会影响体内寄生蜂的发育。因此，多方面的因素导致了实验中部分（36.8%）被寄生有翅桃蚜定殖后却未形成僵蚜。

另外，蚜茧蜂也可能存在追随寄主同步自主远距离迁飞的现象。罗瑞梧等（1994）通过多年的连续系统调查，发现燕麦蚜茧蜂 *Aphidius avenae* Haiday 不能在山东济南越冬越夏，但当地有明显的大范围蚜茧蜂成蜂同期突增突减且在我国东部麦区发生期相互衔接的现象，由此推测燕麦蚜茧蜂可追随寄主麦长管蚜同步自动远距离伴迁。这种主动迁飞现象以及本研究证实的寄生蜂可随寄主有翅蚜迁飞而携播的事实可以帮助解释为什么菜蚜茧蜂的 mtDNA 遗传单倍型与其寄主蚜虫种类（甘蓝蚜和俄罗斯麦双尾蚜）没有相关性（Baer *et al.*，2004），同时也可以解释不同地区（北美、欧洲、亚洲）的同种菜蚜茧蜂检测不到遗传变化的原因（Baker *et al.*，2003）。菜蚜茧蜂不存在“寄主宗”极可能与寄主蚜虫很强的迁飞扩散能力有关。本实验成功地证实了有翅蚜迁飞可以携带寄生蜂扩散的假说。如果寄生蜂随寄主有翅蚜扩散的现象普遍存在，这将对寄生蜂的分布及寄生蜂与寄主有翅蚜的协同进化和相作关系产生深远的影响。因而，有必要对蚜虫的扩散生物学、蚜虫与寄生蜂间的相互关系、后代寄生蜂的寄生率等开展进一步的研究。

参考文献（References）

Baer CF, Trip PDW, Bjorksten TA, Antolin MF, 2004. Phylogeography of a parasitoid wasp (*Diaeretiella rapae*): No evidence of host-associated lineages. *Molecular Ecology*, 13: 1 859 – 1 869.

Baker DA, Loxdale HD, Edwards OR, 2003. Genetic variation and founder effects in the parasitoid wasp, *Diaeretiella rapae* (M'intosh) (Hymenoptera: Braconidae: Aphidiidae), affecting its potential as a biological control agent. *Molecular Ecology*, 12: 3 303 – 3 311.

Bi ZB, Ji ZD, 1993. Bionomics of *Aphidius gifuensis* Ashmead I. Development stages and morphology of larval stage. *Journal of Hebei Agricultural University*, 16(2): 1 – 8. [毕章宝，季正端，1993. 烟蚜茧蜂 *Aphidius gifuensis* Ashmead 生物学研究 I. 发育过程和幼期形态. 河北农业大学学报，16(2): 1 – 8]

Bi ZB, Ji ZD, 1994. Bionomics of *Aphidius gifuensis* Ashmead II. Bionomics of adult and over winter. *Journal of Hebei Agricultural University*, 17(2): 38 – 44. [毕章宝，季正端，1994. 烟蚜茧蜂 *Aphidius gifuensis* Ashmead 生物学研究 II. 成虫生物学及越冬. 河北农业大学学报，17(2): 38 – 44]

Chen C, Feng MG, 2004. *Sitobion avenae* alate infected by *Pandora neoaphidis*: Their flight ability, post-flight colonization, and mycosis transmission to progeny colonies. *Journal of Invertebrate Pathology*, 86: 117 – 123.

Chen C, Feng MG, 2005. Epizootiological modeling of *Pandora neoaphidis* mycosis transmission in *Myzus persicae* colonies initiated by primarily infected alates. *Applied and Environmental Microbiology*, 71: 4 104 – 4 107.

Chen C, Feng MG, 2006. Experimental simulation of transmission of an obligate aphid pathogen with aphid flight dispersal. *Environmental Microbiology*, 8(1): 69 – 76.

Cheng DF, Tian Z, Sun JR, Ni HX, Li GB, 1997. A computer monitored flight mill system for tiny insects such as aphids. *Acta Entomologica Sinica*, 40 (Suppl.): 172 – 179. [程登发，田喆，孙京瑞，倪汉祥，李光博，1997. 适用于蚜虫等微小昆虫的飞行磨系统. 昆虫学报，40（增刊）: 172 – 179]

DeBach P, 1964. Biological Control of Insect Pests and Weeds. Chapman & Hall, London. 844 pp.

Dixon AFG, 1987. Parthenogenetic reproduction and the rate of increase in aphids. In: Minks AK, Harrewijn P eds. Aphids, Their Biology, Natural Enemies and Control, Vol. A. Elsevier, Amsterdam, Netherlands. 269 – 288.

Dixon AFG, 1998. Aphid Ecology: An Optimization Approach. Chapman & Hall, London. 300 pp.

Feng MG, Chen C, Chen B, 2004. Wide dispersal of aphid-pathogenic entomophthorales aphids relies upon migratory alates. *Environmental Microbiology*, 6: 510 – 516.

Feng MG, Chen C, Shang SW, Ying SH, Shen ZC, Chen XX, 2007. Aphid dispersal flight disseminates fungal pathogens and parasitoids as natural control agents of aphids. *Ecological Entomology*, 32: 97 – 104.

Havill NP, Foottit RG, 2007. Biology and evolution of Adelgidae. *Annual Review of Entomology*, 52: 325 – 349.

Huang ZH, Feng MG, Chen XX, Liu SS, 2008. Pathogenic fungi and parasitoids of aphids present in air captures of migratory alates in the low-latitude plateau of Yunnan, China. *Environmental Microbiology*, 37(5): 1 264 – 1 271.

Hufbauer RA, 2001. Pea aphid-parasitoid interactions: Have parasitoids adapted to differential resistance? *Ecology*, 82: 717 – 725.

King BH, 1987. Offspring sex ratios in parasitoid wasps. *The Quarterly Review of Biology*, 62(4): 367 – 396.

Liu SS, 1987. Introduce a new method to feed aphid — take use of rounded leaf. *Entomological Knowledge*, 24: 113 – 115. [刘树生，1987. 介绍一种饲养蚜虫的方法—新的叶子圆片法. 昆虫知识，24: 113 – 115]

Liu SS, 1990. The relationship between the age at parasitization and parasite impact in *Myzus persicae*. *Acta Entomologica Sinica*, 33(4): 430 – 436. [刘树生，1990. 桃蚜被寄生龄期与受寄生蜂影响大小的关系. 昆虫学报，33(4): 430 – 436]

Luo RW, Yang CL, Shang YF, Li CS, Zhao JH, 1994. Studies on the population dynamics and aphid control capability of *Aphidius avenae*. *Acta Phytophylacica Sinica*, 21(2): 163 – 168 [罗瑞梧，杨崇良，尚佑芬，李长松，赵玖华，1994. 燕麦蚜茧蜂种群动态及其控蚜效能研究. 植物保护学报，21(2): 163 – 168]

Mackauer M, Stary P, 1967. Hymenoptera. Ichneumonoidea. World

Aphidiidae. In: Delluchi V, Remaudière G eds. Index of Entomophagous Insects. Le Francois, Paris. 195 pp.

Robert Y, 1987. Dispersion and Migration. In: Minks AK, Harrewijn P eds. Aphids, Their Biology, Natural Enemies and Control, Vol. 2A, World Crop Pests. Elsevier, Amsterdam, Netherlands. 299 –313.

Schellhorn NA, Kuhman TR, Olson AC, Ives AR, 2002. Competition between native and introduced parasitoids of aphids: Nontarget effects and biological control. *Ecology*, 83: 2 745 –2 757.

Snyder WE, Ives AR, 2003. Interactions between specialist and generalist natural enemies: Parasitoids, predators, and pea aphid biocontrol. *Ecology*, 84: 91 –107.

Stary P, 1988. Aphidiidae. In: Minks AK, Harrewijn P eds. Aphids: Their Biology, Natural Enemies and Control. Vol. 2B, World Crop Pests. Elsevier, Amsterdam. 171 –184.

Tang QY, Feng MG, 2002. DPS Data Processing System for Practical Statistics. Science Press, Beijing. 648 pp. [唐启义, 冯明光, 2002. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统. 北京: 科学出版社. 648 页]

Wu XF, Deng JH, Huang JM, Liu J, 2003. Studies on the selectivity of *Aphidus gifuensis* parasitizing *Myzus nicotianae* (Black) and the effect of the female parasite age on the sex of its progeny. *Chinese Tobacco Science*, 9(2): 31 –34. [吴兴富, 邓建华, 黄江梅, 刘江, 2003. 烟蚜茧蜂对烟蚜的选择性寄生及雌蜂年龄对后代性别的影响. 中国烟草学报, 9(2): 31 –34]

(责任编辑: 袁德成)